

50

Int. Cl. 2:

**G 01 B 7/22**

19 BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



**DE 27 15 831 A 1**

11

# Offenlegungsschrift **27 15 831**

21

Aktenzeichen: P 27 15 831.2

22

Anmeldetag: 7. 4. 77

43

Offenlegungstag: 19. 10. 78

30

Unionspriorität:

50

Bezeichnung: Vorrichtung zur kapazitiven Dehnungsmessung

70

Anmelder: Electric Power Research Institute, Inc., Palo Alto, Calif. (V.St.A.)

74

Vertreter: Vossius, V., Dipl.-Chem. Dr. rer.nat., Pat.-Anw., 8000 München

72

Erfinder: Norris, Elwood B.; Yeakley, Lester M.; San Antonio, Tex. (V.St.A.)

**DE 27 15 831 A 1**

DIPL.-CHEM. DR. VOLKER VOSSIUS  
PATENTANWALT

8 MÜNCHEN 86, 7. APR. 1977  
SIEBERTSTRASSE 4  
P.O. BOX 86 07 67  
PHONE: (0 89) 47 40 75  
CABLE ADDRESS: BENZOLPATENT MÜNCHEN  
TELEX 5-29453 VOPAT D

2715831

5 u.z.: M 162  
Case: 6092-1D

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC.  
Palo Alto, California, V.St.A.

10

"Vorrichtung zur kapazitiven Dehnungsmessung"

15

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Vorrichtung zur kapazitiven Deformationsmessung,  
gekennzeichnet durch mindestens zwei jeweils  
einen Spalt zwischen sich begrenzende Trägerplatten (10, 12,  
20 14), zwei auf der den Spalt begrenzenden Oberfläche einer  
Trägerplatte (12) angeordnete erregbare Kondensatorplatten  
(22, 24, 22', 24'), eine auf der den Spalt begrenzenden  
Oberfläche der anderen Trägerplatte (10, 14) und parallel  
zu den erregbaren Kondensatorplatten (22, 24, 22', 24') an-  
25 geordnete Kondensatormeßplatte (28, 28') und eine Blendenan-  
ordnung (32, 34, 32', 34') zwischen den Kondensatorplatten  
(22, 24 bzw. 22', 24') und der Kondensatormeßplatte (28 bzw.  
28') zur Veränderung der Differenz der Kapazitäten zwischen

L

809842/0134

ORIGINAL INSPECTED

1 den Kondensatorplatten (22, 24) bzw. 22', 24') und der Kondensatormeßplatte (28 bzw. 28') in Abhängigkeit einer Veränderung der Blendeneinstellung.

5 2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Blendenanordnung (2) je mindestens eine Durchbrechung (32a bzw. 34a) aufweisende Blendenplatten (32, 34, 32', 34') aufweist, daß sich die Durchbrechungen (32a) der einen Blendenplatte (32, 32') mit den Durchbrechungen (34a) der anderen Blendenplatte (34, 34') überlappen, um dadurch Kondensatorpalte (C1, C2) zu bilden, deren Größe mit der Verschiebung der Blendenplatten (32, 34 bzw. 32', 34') relativ zueinander veränderbar ist, daß die Blendenplatten (32, 34, 32', 34') nach entgegengesetzten Seiten aus dem 15 Spalt herausragen und daß Kupplungsmittel (33, 35, 33') vorgesehen sind, um die aus dem Spalt herausragenden Abschnitte der Blendenplatten (32, 34, 32', 34) mit der Meßoberfläche zu verbinden, in der eine Deformation gemessen werden soll.

20 3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Kupplungsmittel ein Paar von Abstandselementen (33, 35, 33') umfassen, die in ihrer Dicke dem Abstand zwischen den jeweils nach außen herausragenden Abschnitten der Blendenplatten (32, 34, 32', 34') und der 25 Meßoberfläche entsprechen.

4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die erregbaren Kondensatorplatten (22, 24, 22', 24') eine Mehrzahl länglicher, parallel

809842/0134

1 und mit einem Abstand zueinander angeordneter fingerartiger  
Vorsprünge aufweisen, wobei die Vorsprünge einer Kondensator-  
platte (22, 22') jeweils zwischen den Vorsprüngen der anderen  
Kondensatorplatte (24, 24') liegen.

5

5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch  
gekennzeichnet, daß sie eine Oszillatoreinrich-  
tung (60) umfaßt, um Wechselstromträgersignale an die erreg-  
baren Kondensatorplatten (22, 24, 22', 24') anzulegen, wobei  
10 das an die eine erregbare Kondensatorplatte (22, 22' bzw. 24,  
24') angelegte Trägersignal bezüglich des an die andere  
aktive Kondensatorplatte (24, 24' bzw. 22, 22') angelegten  
Trägersignals um  $180^\circ$  phasenverschoben ist, und daß ein  
15 phasenempfindlicher Detektor (165) vorgesehen ist zur Messung  
von Größe und Phase der durch die Blendenanordnung hindurch  
an die Kondensatormeßplatte (28, 28') gekoppelten Signale.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekenn-  
zeichnet, daß drei stapelartig übereinander geschich-  
20 tete Trägerplatten (10, 12, 14) vorgesehen sind, von denen  
je zwei einen Spalt zwischen sich definieren, daß in jedem  
Spalt mindestens ein kapazitätsveränderndes, verschiebbar  
angeordnetes und aus dem Spalt herausragendes Element angeord-  
net ist, daß der eine der zwischen je zwei Trägerplatten (10,  
25 12 bzw. 12, 14) ausgebildeten Deformationsmesser (16, 16')  
gegenüber dem anderen Deformationsmesser (16', 16) um einen  
vorbestimmten Winkel verdreht angeordnet ist und daß Kupp-  
lungsmittel (33, 35, 33') vorgesehen sind, um die nach außen  
L herausragenden Abschnitte der kapazitätsverändernden Elemente L  
809842/0134

1 mit der Meßoberfläche zu verbinden, in der eine Deformation  
gemessen werden soll.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der vorbestimmte Winkel etwa  $90^{\circ}$  beträgt, wodurch die Meßachsen der beiden Deformationsmesser (16, 16') orthogonal zueinander verlaufen.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Verbindungsmitte eine Mehrzahl von Abstandselementen (33, 35, 33') umfassen, die in ihrer Dicke dem Abstand zwischen den jeweils nach außen hervorragenden Abschnitten der kapazitätsverändernden Elemente (32, 34, 32', 34') und der Meßoberfläche entsprechen.

15

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Deformationsmesser (16, 16') jeweils mindestens eine erregbare Kondensatorplatte (22, 24, 22', 24') an der Oberfläche einer spaltbegrenzenden Trägerplatte (12) und eine parallel zu der Kondensatorplatte (22, 22', 24, 24') angeordnete Kondensatormeßplatte (28, 28') an der zum Spalt hinweisenden Oberfläche der anderen Trägerplatte (10, 14) aufweisen, wobei das kapazitätsverändernde Element (32, 34, 32', 34') zwischen der Kondensatorplatte (22, 24, 22', 24') und der Kondensatormeßplatte (28, 28') liegt.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß mit jeder der erregbaren Kondensator-

1 platten (22, 22', 24, 24') eine Oszillatoreinrichtung (60) zum Erzeugen eines Wechselstromträgersignals verbunden ist und daß ein Detektor (165) vorgesehen ist, um die durch die entsprechenden Kapazitätsverändernden Elemente (32, 34, 5 32', 34') hindurch mit den Kondensatormeßplatten (28, 28') gekuppelten Wechselstromträgersignale aufzunehmen.

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektorvorrichtung 10 einen mit der Kondensatormeßplatte (28) verbundenen Ladungsverstärker (62) aufweist und daß eine den Ausgang und den Eingang des Ladungsverstärkers (62) miteinander koppelnde Rückkopplungsschleife vorgesehen ist, um ein virtuelles Erdpotential am Verstärkereingang zu erzeugen.

15

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückkopplungsschleife einen Kondensator (66) aufweist.

20

13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß sie einen phasenempfindlichen Demodulator (165) aufweist, der mit dem Ausgang (64) des Ladungsverstärkers (62) verbunden ist.

25

2715831

5 u.Z.: M 162

Case: 6092-1D

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC.

Palo Alto, California, V.St.A.

10

---

"Vorrichtung zur kapazitiven Dehnungsmessung"

---

15 Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Messung von Dehnungen oder Spannungen, insbesondere einen biaxialen kapazitiven Dehnungsmesser.

20 Es ist üblicherweise wünschenswert, die auf verschiedene Elemente einer Struktur einwirkenden Belastungen und Kräfte zu bestimmen, um sicherzustellen, daß diese Elemente in der geeigneten Weise konstruiert sind, um den auf sie einwirkenden Belastungen mit einem gewissen Sicherheitsspielraum standhalten zu können. Während in einfachen Strukturen bei Kenntnis der Belastungen die Spannungskräfte leicht berechnet werden können, werden diese Berechnungen für komplizierte Strukturen und/oder unbekannte Lasten unverhältnismäßig komplex und ihre Lösung ist in vielen Fällen praktisch unmöglich. So ist es in vielen Anwendungsbereichen wünschenswert, die Kräfte empirisch zu bestimmen. Im allgemeinen sind die Kräfte einer

809842/0134

1 direkten Messung nicht zugänglich. Vielmehr wird die mit der angreifenden Kraft in einer direkten funktionalen Beziehung stehende Dehnung oder Deformation des Materials unter Verwendung von Dehnungs- oder Spannungsmessern gemessen.

5

Ein Dehnungsmesser oder Dehnungsmesswandler ist eine Vorrichtung, welche eine Änderung einer elektrischen Größe in Abhängigkeit der Spannung oder der Deformation des Materials zeigt, mit dem sie verbunden ist. Der am weitesten verbreitete Typ ist der Widerstandsdehnungsmesser, umfassend einen Draht, der bei Dehnung eine Änderung seines elektrischen Widerstandes zeigt. Dieser Draht des Widerstandsdehnungsmessers wird an der Oberfläche des Materials, in dem eine Spannung gemessen werden soll, so befestigt, daß die auftretende Spannung oder Dehnung eine entsprechende Änderung des Widerstandes hervorruft. Eine geeignete elektronische Schaltung, die üblicherweise eine Wheatstone-Brücke umfaßt, dient dazu, die Änderung des Widerstandes und damit die Dehnung zu erfassen und zu messen.

15

Unglücklicherweise zeigen Drähte, welche die wünschenswerten Eigenschaften für eine Verwendung in Widerstandsdehnungsmessern aufweisen, im allgemeinen auch Änderungen des Widerstandes in Abhängigkeit von Temperaturänderungen. Für kurze Zeitabschnitte können diese Änderungen durch eine Temperaturkompensationsschaltung kompensiert werden. Längeres Einwirken von höheren Temperaturen aber kann zu Änderungen des Widerstandes führen, die durch unter der Bezeichnung "thermisches Altern" bekannte Erscheinungen hervorgerufen werden. Diese

1 Änderungen des Widerstandes können im allgemeinen nicht kompen-  
siert werden.

5 Eine andere Art von Dehnungsmessern oder Dehnungsmeßwandlern  
verwendet die Änderung einer Kondensatorkapazität in Abhängig-  
keit der Dehnung oder Spannung als Meßgröße. Die bisherigen  
kapazitiven Dehnungsmesser sind in der Weise ausgebildet, daß  
die operativen Elemente der Vorrichtung der Belastung ausge-  
setzt sind. In diesen kapazitiven Dehnungsmessern und in  
10 Widerstandsdehnungsmessern, bei denen in ähnlicher Weise das  
elektrische Widerstandselement den einwirkenden Kräften aus-  
gesetzt ist, ändern sich die elektrischen Eigenschaften der  
Meßvorrichtungen allmählich bei längerer Einwirkung einer Be-  
lastung als Folge einer permanenten Deformation der belaste-  
15 ten Elemente. Diese Erscheinungen werden allgemein als "Krie-  
chen" bezeichnet. Infolge des Kriechens und des thermischen  
Alterns sind Dehnungsmesser im allgemeinen instabil, wenn sie  
Über lange Zeiträume und insbesondere bei hohen Temperaturen  
verwendet werden.

20 Im allgemeinen sind Dehnungsmesser einachsig, d.h. sie reagie-  
ren nur auf Dimensionsänderungen in einer einzigen Richtung.  
Um die Kräfte an einem Punkt genau bestimmen zu können, ist  
es aber notwendig, die Dehnung oder Spannung in mindestens  
25 zwei Richtungen zu messen, woraus sich die wahre Größe und  
Richtung der Spannung bestimmen läßt. Zu diesem Zwecke können  
zwei oder mehr Dehnungsmesser nahe beieinander und mit einer  
bestimmten Winkelstellung zueinander an der zu untersuchenden  
Oberfläche angebracht werden. Diese Annäherung wird ungenau,

1 wenn die tatsächlich gemessenen Spannungen nicht an exakt der gleichen Stelle auftreten. Daher sind im allgemeinen Dehnungsmesser vorzuziehen, die übereinandergeschichtet werden können, um auf diese Weise einen mehrachsigen Dehnungsmesser zu schaffen. Dieser kann auf in unterschiedlichen Richtungen wirkende Spannungen ansprechen, die im wesentlichen an ein und der selben Stelle der zu prüfenden Materialoberfläche registriert werden.

10 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen kapazitiven Dehnungsmesser anzugeben, der eine verbesserte Langzeitstabilität aufweist und im wesentlichen unanfällig ist für thermisches Altern und Kriechen. Ferner soll der kapazitive Dehnungsmesser so ausgebildet sein, daß er für die Herstellung eines mehrachsigen kapazitiven Dehnungsmessers geeignet ist und bei einfacher Bauart zuverlässig und genau arbeitet.

20 Zur Lösung dieser Aufgaben wird gemäß einer bevorzugten Ausführung der Erfindung ein zweiachsiger kapazitiver Dehnungsmesser mit einer lamellaren Schichtenstruktur vorgeschlagen, die zwei einachsige kapazitive Dehnungsmesser mit orthogonal zueinander liegenden Messrichtungen definiert. Jeder kapazitive Dehnungsmesser umfaßt aktive durch einen Oszillator erregte Kondensatorplatten und eine Kondensatormeßplatte, die 25 in einem Abstand zu den erregten Kondensatorplatten und parallel zu diesen angeordnet ist. Ein Blendenmechanismus in Form zweier mit Durchbrechungen versehenen Blendenplatten ist zwischen den aktiven Kondensatorplatten und den Kondensatormeßplatten angeordnet. Die Endabschnitte der mit Durch- 1

- 1 brechungen versehenen Blendenplatten ragen aus der Schichtenstruktur und sind mit der Oberfläche verbunden, in welcher eine Spannung oder Dehnung gemessen werden soll. Eine Spannung führt zu einer relativen Verschiebung zwischen den Blendenplatten,
- 5 was wiederum eine Änderung der durch die Durchbrechungen hindurch erfolgenden kapazitiven Kopplung zwischen der Kondensatormeßplatte und den aktiven Kondensatorplatten zur Folge hat.
- 10 Diese Kapazitätsdifferenz steht daher in einer funktionalen Beziehung zu der zu messenden Spannung und wird durch eine geeignete elektronische Vorrichtung registriert und gemessen. In einer besonderen Ausführung werden die aktiven Kondensatorplatten jedes Dehnungsmessers durch zwei in der Amplitude gleiche aber um  $180^\circ$  gegeneinander phasenverschobene Signale erregt. Der von den Blendenplatten gebildete Blendenmechanismus bewirkt infolge der im Material auftretenden Spannung eine Abnahme der Kapazität zwischen der einen aktiven Kondensatorplatte und der Kondensatormeßplatte und gleichzeitig eine Zunahme der Kapazität zwischen der anderen aktiven Kondensatorplatte und der Kondensatormeßplatte. Die resultierende Änderung in den Signalniveaus wird von einem phasenempfindlichen Demodulator aufgenommen, der ein der Spannung proportionales Analogsignal erzeugt.
- 25 Da die den Blendenmechanismus bildenden Blendenplatten des kapazitiven Dehnungsmessers gemäß der vorliegenden Erfindung keinen Spannungskräften ausgesetzt sind, ist die Erscheinung des Kriechens im wesentlichen ausgeschaltet. Ferner werden

alle Kondensatorplatten in einer festen Zuordnung zueinander gehalten, um auf diese Weise die Erscheinungen des thermischen Alterns und Kriechens auf ein Minimum zu reduzieren. Damit erhält man einen kapazitiven Dehnungsmesser mit verbesserter Langzeitstabilität. Die für den zweiachsigen kapazitiven Dehnungsmesser gemäß der vorliegenden Erfindung verwendete elektronische Vorrichtung ist relativ unbeeinflußt von Verstärkerdrift oder Störsignalen. Insbesondere können die Ausgänge des Dehnungsmessers auf einem virtuellen Erdpotential gehalten werden durch Verwendung einer geeigneten negativen Rückkopplungsschleife in Verbindung mit den Verstärkern, die mit den Ausgängen des Dehnungsmessers verbunden sind. Wenn die Kapazitäten zwischen den aktiven Kondensatorplatten und der Kondensatormeßplatte nicht im Gleichgewicht stehen, liefert daher der Ausgang des Verstärkers über die Rückkopplungsschleife die notwendige Ladung, um den Eingang auf das virtuelle Erdpotential zu bringen. Wenn die Ausgangsleitungen des Dehnungsmessers auf dem Erdpotential liegen, gibt es keine kapazitive Kopplung zwischen diesen Leitungen und der Erde. So kann ein geerdetes abgeschirmtes Kabel verwendet werden, um die Leitungen gegen Störsignale abzuschirmen. Die Drähte von beiden Kondensatormeßplatten des zweiachsigen Dehnungsmessers können in der gleichen Abschirmung geführt werden, ohne daß ein "Übersprechen" stattfindet. Die Kabel können lang ausgeführt sein und eine Umlaufwicklung tragen, ohne daß dabei nachteilige Auswirkungen auftreten.

Weitere Merkmale und Vorteile ergeben sich aus der folgenden Beschreibung, in der in Verbindung mit den beiliegenden

1 Zeichnungen die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels  
erläutert wird. Es stellen dar:

5 Fig. 1 eine teilweise aufgebrochene perspektivische Ansicht  
eines zweiachsigen kapazitiven Dehnungsmessers gemäß  
einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden  
Erfindung,

10 Fig. 2 einen Querschnitt durch die in Fig. 1 dargestellte  
Vorrichtung,

Fig. 3a und 3b Draufsichten auf die aktiven Kondensatorplat-  
ten der in Fig. 1 dargestellten Vorrichtung,

15 Fig. 4 eine teilweise aufgebrochene Draufsicht auf die  
den Blendenmechanismus bildenden Blendenplatten in  
der in Fig. 1 dargestellten Vorrichtung, und

20 Fig. 5 ein schematisches Diagramm des zweiachsigen kapazi-  
tiven Dehnungsmessers gemäß der Erfindung mit der  
zugehörigen elektronischen Schaltung.

25 In den Fig. 1 und 2 erkennt man einen allgemein mit A be-  
zeichneten zweiachsigen kapazitiven Dehnungsmesser gemäß  
einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung. Der Dehnungs-  
messer A umfaßt drei Trägerplatten oder Lamellen 10, 12 und  
14, die aufeinandergeschichtet sind, wobei jeweils zwei  
Lamellen 10, 12 bzw. 12, 14 einen Spalt zwischen sich be-

1 grenzen. Ein erster einachsiger kapazitiver Dehnungsmesser 16, der auf eine Spannung in einer ersten Richtung oder Achse anspricht, ist in dem Spalt zwischen den einander benachbarten und in einem Abstand zueinander angeordneten Oberflächen der  
5 Lamellen 10 und 12 ausgebildet. In gleicher Weise ist ein zweiter Dehnungsmesser 16' in dem Spalt zwischen den einander benachbarten und in einem Abstand zueinander angeordneten Oberflächen der Lamellen 12 und 14 ausgebildet. Der zweite Dehnungsmesser 16' spricht auf eine Spannung in einer zweiten  
10 Richtung oder Achse an, die in einem rechten Winkel zu der ersten Achse verläuft.

Gemäß der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der zweite Dehnungsmesser 16' in seinem Aufbau im wesentlichen  
15 identisch mit dem ersten Dehnungsmesser 16, jedoch gegenüber diesem um 90° versetzt, um dadurch die Meßachsen der Dehnungsmesser 16 und 16' orthogonal zueinander auszurichten. Es wird daher nur der erste Dehnungsmesser 16 im Detail beschrieben, wobei diese Beschreibung auch für den zweiten  
20 Dehnungsmesser 16' gilt. Zum leichteren Verständnis sind die in Verbindung mit dem ersten Dehnungsmesser 16 verwendeten Bezugsziffern in den Zeichnungen auch für entsprechende Elemente des zweiten Dehnungsmessers 16' verwendet worden unter Hinzufügen eines Striches. Das heißt die Elemente 22, 24  
25 usw. des ersten Dehnungsmessers 16 entsprechen Elementen 22', 24' usw. des zweiten Dehnungsmessers 16'.

Der Dehnungsmesser 16 umfaßt zwei aktive Kondensatorplatten

1 22 und 24, die auf der zum Spaltinneren hinweisenden Oberfläche  
der Lamelle 12 angeordnet sind. Die Kondensatorplatten 22 und  
24 werden als aktive Kondensatorplatten bezeichnet, da sie  
durch Signale von der in Verbindung mit dem Dehnungsmesser  
5 verwendeten elektronischen Einrichtung erregt werden. In  
Fig. 3a erkennt man, daß die aktiven Kondensatorplatten 22 und  
24 in einer Ebene liegen und jeweils mit einer Reihe von  
parallel zueinander liegenden länglichen Vorsprüngen oder  
- Fingern ausgebildet sind, die an ihrer Basis miteinander ver-  
10 bunden sind. Die Finger der aktiven Kondensatorplatten 22  
und 24 greifen derart ineinander, daß die Finger der aktiven  
Kondensatorplatten 22 und 24 in alternierender Folge parallel  
zueinander in einer Reihe liegen. Wie man aus dem folgenden  
noch genauer erkennen wird, verlaufen die Finger der aktiven  
15 Kondensatorplatten 22 und 24 im wesentlichen senkrecht zur  
Spannungsmeßachse des Dehnungsmessers 16. So erkennt man aus  
Fig. 3b, in der die aktiven Kondensatorplatten 22' und 24'  
des zweiten Dehnungsmessers 16' dargestellt sind, daß die  
Kondensatorplatten 22' und 24' um  $90^\circ$  relativ zu den Konden-  
satorplatten 22 und 24 gedreht sind, wodurch die Spannungs-  
20 meßachse des Dehnungsmessers 16' rechtwinklig zur Spannungs-  
meßachse des Dehnungsmessers 16 verläuft.

Ein Überzug aus einem dielektrischen Material bedeckt die  
25 Kondensatorplatten 22 und 24. Der dielektrische Überzug 26  
dient zur Isolierung der aktiven Kondensatorplatten 22 und  
24 gegenüber den anderen Elementen des Dehnungsmessers 16.  
- Eine Ecke der Kondensatorplatten 22 und 24 ist jeweils nicht

1 isoliert, so daß elektrische Leitungen 38 und 40 an den entsprechenden Kondensatorplatten 22 und 24 befestigt werden können, was üblicherweise durch Punktschweißen erfolgt.

5 Auf der zum Spaltinneren hinweisenden inneren Oberfläche der Lamelle 10 ist eine Kondensatormeßplatte 28 angeordnet. Die Kondensatormeßplatte 28 ist auf diese Weise parallel und in einem Abstand zu den aktiven Kondensatorplatten 22 und 24 gehalten. Die Kondensatormeßplatte 28 hat allgemein eine 10 rechteckige Form, entsprechend dem von den Fingern der Kondensatorplatte 22 und 24 eingenommenen Bereich. Die Kondensatormeßplatte 28 wird so genannt, weil sie mit einer geeigneten elektronischen Vorrichtung zum Messen der Änderung in 15 der Kapazitätsdifferenz der aktiven Platten 22 und 24 verbunden ist. Eine elektrische Leitung 36 ist daher an der Kondensatormeßplatte 28 befestigt, und zwar vorzugsweise durch Punktschweißen an einer Ecke der Kondensatormeßplatte 28. Die Oberfläche der Kondensatormeßplatte 28 ist von einer 20 dielektrischen Schicht 30 bedeckt, ähnlich dem die Kondensatorplatten 22 und 24 bedeckenden dielektrischen Überzug 26, um die Kondensatormeßplatte 28 von den übrigen Elementen des Dehnungsmessers 16 zu isolieren.

Wie man aus den Fig. 2 und 4 erkennt, ist zwischen den aktiven Kondensatorplatten 22 und 24 und der Kondensatormeßplatte 28 ein Blendenmechanismus in Form von mit Durchbrechungen versehenen Blendenplatten 32 und 34 angeordnet. Die Blendenplatten 32 und 34 sind in dem zwischen den Lamellen 25 10 und 12 definierten Spalt so gelagert, daß sie längs der

1 Spannungsmeßachse des Dehnungsmessers 16 bewegt werden können.  
Die Blendenplatten 32 und 34 erstrecken sich nach entgegen-  
gesetzten Seiten über die Lamellen 10 und 12 hinaus, so daß sie  
mit der Oberfläche verbunden werden können, in der eine Dehnung  
5 oder Spannung gemessen werden soll. Zu diesem Zweck sind an  
den äußeren Enden der Blendenplatten 32 und 34 Distanzelemente  
33 bzw. 35 befestigt. Die Dicke der Distanzelemente 33 und 35  
entspricht dem Abstand zwischen den Blendenplatten 32 und 34  
und der Oberfläche, in der eine Deformation  
10 bzw. Dehnung gemessen werden soll. Daher führt ein Zusammen-  
drücken oder Dehnen der Oberfläche, in welcher eine Spannung  
gemessen werden soll, zu einer Verschiebung der Blendenplat-  
ten 32 und 34 relativ zueinander. Diese Verschiebung wird da-  
zu verwendet, eine Kapazitätsdifferenz zwischen den aktiven  
15 Kondensatorplatten 22 und 24 und der Kondensatormeßplatte 28  
zu erzeugen.

Wie man in Fig. 4 erkennt, weisen die Blendenplatten 32 und  
34 jeweils eine Mehrzahl von rechteckigen Durchbrechungen  
20 auf, die mit 32a bzw. 34a bezeichnet sind. Die Durchbrechun-  
gen 32a und 34a sind parallel zu den Fingern der aktiven  
Kondensatorplatten 22 und 24 ausgerichtet. Wenn die Blenden-  
platten 32 und 34 übereinander liegen, sind die Durchbrechun-  
gen 32a und 34a gegeneinander versetzt und bilden dadurch eine  
25 Vielzahl von länglichen rechteckigen, durch die Platten 32 und  
34 hindurch offenen Durchtrittsschlitzten. Genauer gesagt ist  
jede der Durchbrechungen 32a bezüglich zweier benachbarter  
Durchbrechungen 34a so zentriert, daß zwei durch die einander

1 Überlappenden Abschnitte der Durchbrechungen 32a und 34a hindurch offene Kondensatorspalte C1 und C2 gebildet sind. Die Zahl der Kondensatorspalte C1 und C2 ist also doppelt so groß wie die Zahl der Durchbrechungen 32a und 34a in den  
5 Blendenplatten 32 bzw. 34.

Auf diese Weise ist eine alternierende Reihe von Kondensatorspalten C1 und C2 gebildet, die sich voneinander in der Weise unterscheiden, daß ihre Abmessungen in entgegengesetzter Weise  
10 variieren, wenn die Blendenplatten 32 und 34 relativ zueinander verschoben werden. So bewirkt eine Einwärtsbewegung der Blendenplatten 32 und 34 eine Verringerung des Kondensatorspaltes C1, während gleichzeitig der Kondensatorspalt C2 vergrößert wird. In dem Dehnungsmesser sind also die Kondensatorspalte C1 nahe den Fingern der Kondensatorplatte 22 angeordnet,  
15 die Kondensatorspalte C2 dagegen nahe den Fingern der Kondensatorplatte 24. Entsprechend führt eine Einwärtsverschiebung der Blendenplatten 32 und 34 zu einer Abnahme der Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 22 und der Kondensatormeßplatte 28, während gleichzeitig die Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 24 und der Kondensatormeßplatte 28 vergrößert wird. In ähnlicher Weise führt eine Auswärtsbewegung der Blendenplatten 32 und 34 zu einer Vergrößerung der Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 22 und der Kondensatormeßplatte 28, wogegen gleichzeitig die Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 24 und der Kondensatormeßplatte 28 verkleinert wird.  
20  
25

└ Das Arbeitsprinzip des Dehnungsmessers liegt also darin, daß └  
809842/0134

1 jeweils die Tatsächlichkapazität zwischen der Kondensator-  
meßplatte 28 und der Kondensatorplatte 22 bzw. 24 durch die  
relative Lage der Blendenplatten bestimmt ist. Die tatsächliche  
Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 22 und der Konden-  
5 satormeßplatte 28 ist der Fläche des Kondensatorpaltes  $C_1$   
proportional. Wird nur ein Kondensatorpalt  $C_1$  betrachtet,  
ergibt sich unter Vernachlässigung von Randeffekten für die  
Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 22 und der Konden-  
satormeßplatte 28:

10

$$C_1 = k \cdot x_1 \cdot l_c$$

Dabei ist  $k$  eine Proportionalkonstante, deren Wert vom  
Plattenabstand und der Dielektrizitätskonstante abhängt.

15 Entsprechend ergibt sich für die Kapazität zwischen der  
Kondensatorplatte 24 und der Kondensatormeßplatte 28:

$$C_2 = k \cdot x_2 \cdot l_c$$

20 Für die Kapazitätsdifferenz erhält man daher:

$$C_d = C_1 - C_2 = k l_c \cdot (x_1 - x_2)$$

da aber

$$x_c = x_1 + x_a + x_2$$

25 folgt

$$C_d = k l_c \cdot (2x_1 + x_a - x_c).$$

Dabei ist mit  $l_c$  die Länge eines Schlitzes 34a, mit  $x_a$  die

L Breite eines Steges zwischen zwei einander benachbarten Durch-  
809842/0134

1 Überlappenden Abschnitte der Durchbrechungen 32a und 34a hindurch offene Kondensatorspalte C1 und C2 gebildet sind. Die Zahl der Kondensatorspalte C1 und C2 ist also doppelt so groß wie die Zahl der Durchbrechungen 32a und 34a in den  
5 Blendenplatten 32 bzw. 34.

Auf diese Weise ist eine alternierende Reihe von Kondensatorspalten C1 und C2 gebildet, die sich voneinander in der Weise unterscheiden, daß ihre Abmessungen in entgegengesetzter Weise  
10 variieren, wenn die Blendenplatten 32 und 34 relativ zueinander verschoben werden. So bewirkt eine Einwärtsbewegung der Blendenplatten 32 und 34 eine Verringerung des Kondensatorspaltes C1, während gleichzeitig der Kondensatorspalt C2 vergrößert wird. In dem Dehnungsmesser sind also die Kondensatorspalte C1 nahe den Fingern der Kondensatorplatte 22 angeordnet,  
15 die Kondensatorspalte C2 dagegen nahe den Fingern der Kondensatorplatte 24. Entsprechend führt eine Einwärtsverschiebung der Blendenplatten 32 und 34 zu einer Abnahme der Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 22 und der Kondensatormeßplatte 28, während gleichzeitig die Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 24 und der Kondensatormeßplatte 28 vergrößert wird. In ähnlicher Weise führt eine Auswärtsbewegung der Blendenplatten 32 und 34 zu einer Vergrößerung der Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 22 und der Kondensatormeßplatte 28, wogegen gleichzeitig die Kapazität zwischen der Kondensatorplatte 24 und der Kondensatormeßplatte 28 verkleinert wird.  
20  
25

Das Arbeitsprinzip des Dehnungsmessers liegt also darin, daß

809842/0134

1 brechungen 32a, mit  $x_c$  die Breite einer Durchbrechung 34a, mit  $x_1$  die Breite eines Kondensatorspaltes  $C_1$  und mit  $x_2$  die Breite eines Kondensatorspaltes  $C_2$  bezeichnet.

5 Die Kapazitätsdifferenz ist also eine Funktion der relativen Lage der Blendenplatten 32 und 34 sowie der Dimensionen der Durchbrechungen 32a und 34a und der Konstante  $k$ .

10 Die Ansprechgenauigkeit des Dehnungsmessers auf eine Relativverschiebung der Blendenplatten 32 und 34 wird ausgedrückt durch:

$$K_x = N \cdot \frac{dCd}{dx_1} = 2N \cdot k l_c$$

15 Dabei gibt  $N$  die Anzahl der Durchbrechungen 32a bzw. 34a an, von denen bei der vorstehenden Analyse nur eine betrachtet wurde.

20 Wie oben bereits kurz ausgeführt wurde, ist der zum Dehnungsmesser 16 orthogonal ausgerichtete Dehnungsmesser 16' mit dem Dehnungsmesser 16 hinsichtlich des Aufbaus und der Arbeitsweise im wesentlichen identisch. Natürlich soll der Dehnungsmesser 16' auf orthogonal zur Spannungsmeßachse des Dehnungsmessers 16 gerichtete Deformationen ansprechen und daher sind alle Elemente des Dehnungsmessers 16' gegenüber den entsprechenden Elementen des Dehnungsmessers 16 um  $90^\circ$  gedreht.

25 Im übrigen stimmen Aufbau und Arbeitsweise mit der vorstehenden Beschreibung überein.

1 Der zweiachsige kapazitive Dehnungsmesser A gemäß der bevor-  
zugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfaßt  
Sicherungseinrichtungen gegen Interferenzerscheinungen und  
Störsignale. Insbesondere sind ein Paar von Abschirmplatten  
5 20 an den äußeren Oberflächen der Lamellen 10 bzw. 14 vorge-  
sehen, die an der Abschirmung des Dehnungsmessers A geerdet  
sind. In der gleichen Weise sind die Blendenplatten 32, 34,  
32' und 34' geerdet. Wenn der Dehnungsmesser A auf einer geer-  
deten Metallocberfläche befestigt wird, kann die Erdung der  
10 jeweiligen Platten durch Berührung mit der Oberfläche erfol-  
gen, in der eine Deformation gemessen werden soll. Im anderen  
Fall, wenn der Dehnungsmesser A auf einer isolierten oder  
nicht geerdeten Oberfläche verwendet werden soll, sollten  
Erdungsleitungen zu den Blendenplatten vorgesehen sein. Zu-  
15 sätzlich zu der Abschirmung durch die Abschirmplatten 20 und  
die Blendenplatten 32 bzw. 34 erfolgt eine zusätzliche Isolie-  
rung gegen Interferenzerscheinungen und Störsignale aus der  
Art der elektronischen Einrichtung, die zusammen mit dem  
Dehnungsmesser A verwendet wird und nun im folgenden beschrie-  
20 ben werden soll.

Unter Bezugnahme auf Fig. 5 soll nun die zusammen mit dem  
Dehnungsmesser A verwendete elektronische Einrichtung genauer  
beschrieben werden. Da die Dehnungsmesser 16 und 16' im  
25 wesentlichen unabhängig voneinander sind, ist eine doppel-  
kanalige Ausführung der elektronischen Einrichtung für die  
beiden Dehnungsmesser 16 und 16' vorgesehen, mit der Ausnahme,  
daß ein einziger Signalgeber zum Erregen der Dehnungsmesser

1 verwendet werden kann. Der Dehnungsmesser 16 wird von einem  
5 einen sehr niedrigen Ausgangswiderstand aufweisenden Oszilla-  
tor 60 her durch zwei gegeneinander um  $180^{\circ}$ -phasenversetzte  
Trägersignale gleicher Amplitude erregt. Die Leitung 38  
10 verbindet also einen ersten Phasenausgang des Oszillators  
60 mit der Kondensatorplatte 22. Entsprechend verbindet die  
Leitung 40 den Ausgang für die zweite Phase (um  $180^{\circ}$  gegenüber  
der ersten Phase phasenversetzt) des Oszillators 60 mit der  
Kondensatorplatte 24. Da ein einziger Oszillator 60 zur Er-  
15 regung beider Dehnungsmesser 16 und 16' verwendet werden kann,  
sind die Kondensatorplatten 22 und 22' parallel zueinander  
an die Leitung 38 und die Kondensatorplatten 24 und 24'  
parallel zueinander an die Leitung 40 angeschlossen.

15 Der Dehnungsmesser 16 kann mit zwei veränderbaren Kondensa-  
toren verglichen werden, die miteinander in der Weise ge-  
koppelt sind, daß ihre Kapazitäten sich invers zueinander  
ändern, wie dies in Fig. 5 dargestellt ist. Die Ausgänge  
20 der beiden Kondensatoren fallen zusammen in der Kondensator-  
platte 28, die mit einer Ausgangsleitung 36 verbunden ist.  
Ohne eine erzwungene Spannung oder Deformation sind die  
von den Blendenplatten 32 und 34 gebildeten Kondensator-  
spalte C1 und C2 im wesentlichen identisch in ihrer Größe,  
so daß gleiche Amplituden des ersten in Phase befindlichen  
25 Oszillatorsignales und des zweiten oder phasenversetzten  
Oszillatorsignales mit der Kondensatormeßplatte 28 ge-  
koppelt werden. Die Signale gleicher Amplitude löschen einan-  
der aus, so daß das Ausgangssignal des Dehnungsmessers 16  
bei nicht vorhandener Deformation gleich Null ist. Ein Zu-

1 sammendrücken der Oberfläche, an der eine Deformation gemessen  
werden soll, führt zu einer Verengung der Kondensatorspalte  
C1 und gleichzeitig zu einer Erweiterung der Kondensator-  
schlitze C2. Daraus ergibt sich eine Reduzierung der Amplitude  
5 des durch die Kondensatorschlitz C1 mit der Kondensatormeß-  
platte 28 gekoppelten, in Phase befindlichen Oszillatorsignals  
und gleichzeitig eine Vergrößerung der Amplitude des durch  
die Kondensatorspalte C2 hindurch mit der Kondensatormeßplatte  
28 gekoppelten phasenverschobenen Oszillatorsignal. Eine  
10 Druckdeformation verursacht also ein phasenverschobenes Aus-  
gangssignal an der Ausgangsleitung 36. Entsprechend bewirkt  
eine Dehnungsdeformation die Vergrößerung der Kondensator-  
spalte C1 und eine Verengung der Kondensatorspalte C2, was  
zu einem in Phase befindlichen Ausgangssignal an der Ausgangs-  
15 leitung 36 führt.

Um das an der Ausgangsleitung 36 auftauchende Signal aufzu-  
nehmen und zu messen, ist die Ausgangsleitung 36 an den Ein-  
gang eines Ladungsverstärkers 62 zur Verstärkung des Signals  
20 angeschlossen. Der Ladungsverstärker 62 weist einen Rück-  
kopplungskondensator 66 auf, der den Ausgang 64 mit dem Ein-  
gang an der Ausgangsleitung 36 koppelt. Die durch den Rück-  
kopplungskondensator 66 bewirkte negative Rückkopplung dient  
dazu, die Ausgangsleitung 36 auf einem virtuellen Erdpotential  
25 zu halten. Insbesondere hat also das Auftauchen eines Signals  
in der Ausgangsleitung 36 zur Folge, daß genügend Ladung auf  
den Rückkopplungskondensator 66 zurückfließt, um die Aus-  
gangsleitung 36 auf ein virtuelles Erdpotential zu bringen.  
Durch das Halten der Ausgangsleitung 36 auf einem virtuellen

1 Erdpotential wird die Empfindlichkeit der Anordnung gegenüber einer Änderung der Kabelkapazität und gegenüber Störsignalen weiter vermindert. Darüberhinaus kann die Ausgangsleitung 36 in einem einfachen geerdeten Abschirmkabel ohne nachteilige  
5 Auswirkungen geführt werden. Die mit dem orthogonal ausgerichteten Dehnungsmesser 16' verbundene Ausgangsleitung 36' kann in dem gleichen Abschirmkabel parallel zur Leitung 36 verlaufen.

10 Der Ausgang 64 des Ladungsverstärkers 62 kann mit einem phasenempfindlichen Detektor 165 zur Erzeugung eines einfachen Gleichstromsignales verbunden sein, das proportional zur Kapazitätsdifferenz und damit proportional zur Deformation ist. Der Detektor 165, beispielsweise ein Demodulator, dient  
15 dazu, die Wechselstromträgersignale zu eliminieren, die sachliche Amplitudeninformation aber zu erhalten. Der Demodulator ist vorzugsweise phasenempfindlich, um eine Unterscheidung zwischen kompressiven und extensiven Deformationen treffen zu können, die entsprechend der vorstehenden Beschreibung Ausgangssignale entgegengesetzter Phase erzeugen.  
20

Für die Konstruktion eines zweiachsigen kapazitiven Dehnungsmessers A entsprechend der vorliegenden Erfindung kann eine Vielzahl von Materialien verwendet werden. Es wurde jedoch  
25 gefunden, daß bestimmte Materialien für die Verwendung des Dehnungsmessers in Umgebungen mit hoher Temperatur besonders geeignet sind. So sind die Lamellen 10, 12 und 14 vorzugsweise aus Aluminium hergestellt, während die Kondensatorplatten 22, 24, 22', 24', die Kondensatormeßplatten 28 und 28'  
L

1 und die Abschirmplatten 20 vorzugsweise aus auf die Oberfläche  
der Lamellen 10, 12 und 14 aufgedrucktem Platin bestehen. Die  
Blendenplatten 32, 34, 32' und 34' sind vorzugsweise aus rost-  
freiem Stahl hergestellt. Die Durchbrechungen 32a, 34a, 32a'  
5 und 34a' werden üblicherweise durch ein übliches Fotoätzver-  
fahren erzeugt. Die dielektrischen Isolierschichten 26, 30,  
26' und 30' können im wesentlichen von einem dünnen Keramik-  
film gebildet sein. Die Leitungen 36, 36', 38 und 40 können  
aus Nickel hergestellt sein. Alle diese Materialien wurden  
10 aufgrund ihres Widerstandes gegen eine Oxidation bei hohen  
Temperaturen ausgewählt, wodurch die bevorzugte Ausführungs-  
form der vorliegenden Erfindung besonders geeignet ist für  
die Verwendung in Umgebungen mit hohen Temperaturen. So wurde  
beispielsweise eine erfindungsgemäße Konstruktion über lange  
15 Zeiträume bei Temperaturen von annähernd  $593,6^{\circ}\text{C}$  ( $1100^{\circ}\text{F}$ )  
erfolgreich verwendet. Natürlich können auch andere für eine  
gegebene Umgebung geeignete und die erforderlichen elektrischen  
Eigenschaften aufweisenden Materialien verwendet werden.

20 Der wesentliche Teil der zwischen den Kondensatorplatten  
einerseits und der Kondensatormeßplatte andererseits ent-  
wickelten Kapazität ist eine Folge des Luftspaltes zwischen  
den Platten. Der Dehnungsmesser A kann jedoch auch mit irgend-  
einer nicht leitenden Flüssigkeit in dem Spalt zwischen diesen  
25 Platten arbeiten, so lange diese Flüssigkeit die Bewegung  
der Blendenplatten 32, 34, 32' und 34' nicht physisch be-  
hindert.

1 Der Dehnungsmesser A gemäß der vorliegenden Erfindung kann in  
jeder beliebigen Größe gebaut werden. Eine geeignete Aus-  
führungsform weist einen Lamellenstapel von im wesentlichen  
quadratischem Grundriß auf mit einer Kantenlänge von 12,7 mm  
5 und einer Höhe von 2,31 mm. Eine bevorzugte Nenndicke für alle  
Platten und Schichten mit Ausnahme der Lamellen 10, 12 und 14  
ist 0,0254 mm. Es wurde gefunden, daß bei einer derartigen  
Konstruktion eine Zahl von vier Durchbrechungen 32a oder 34a  
10 in den Blendenplatten 32 oder 34 geeignet ist. Entsprechend  
weisen bei dieser Ausführungsform die Kondensatorplatten 22  
und 24 jeweils vier längliche Vorsprünge oder Finger auf,  
wobei vier Kondensatorspalte C1 zur Kopplung der Kondensator-  
platte 22 an die Kondensatormeßplatte 28 und vier Kondensator-  
spalte C2 zur Kopplung der Kondensatorplatte 24 an die Konden-  
satormeßplatte 28 vorhanden sind. Natürlich können je nach der  
15 gewünschten Größe und Form des Dehnungsmessers auch andere  
Abmessungen und Anzahlen von Durchbrechungen und Spalten ver-  
wendet werden.

20

25

- 27 -

**Nummer:** 27 15 831  
**Int. Cl.:** G 01 B 7/22  
**Anmeldetag:** 7. April 1977  
**Offenlegungstag:** 19. Oktober 1978

2715831

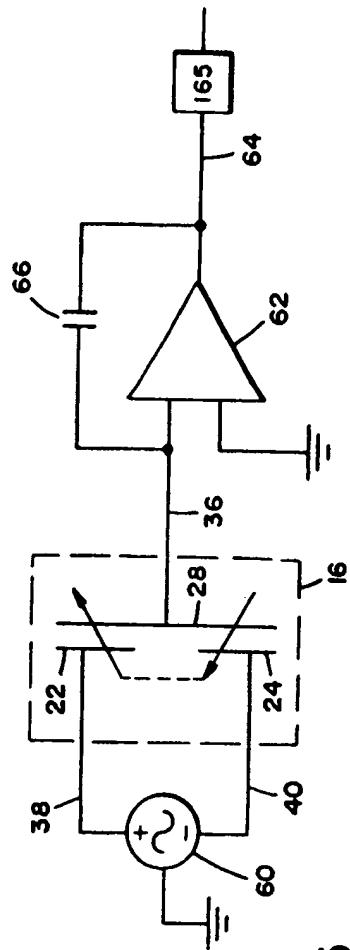
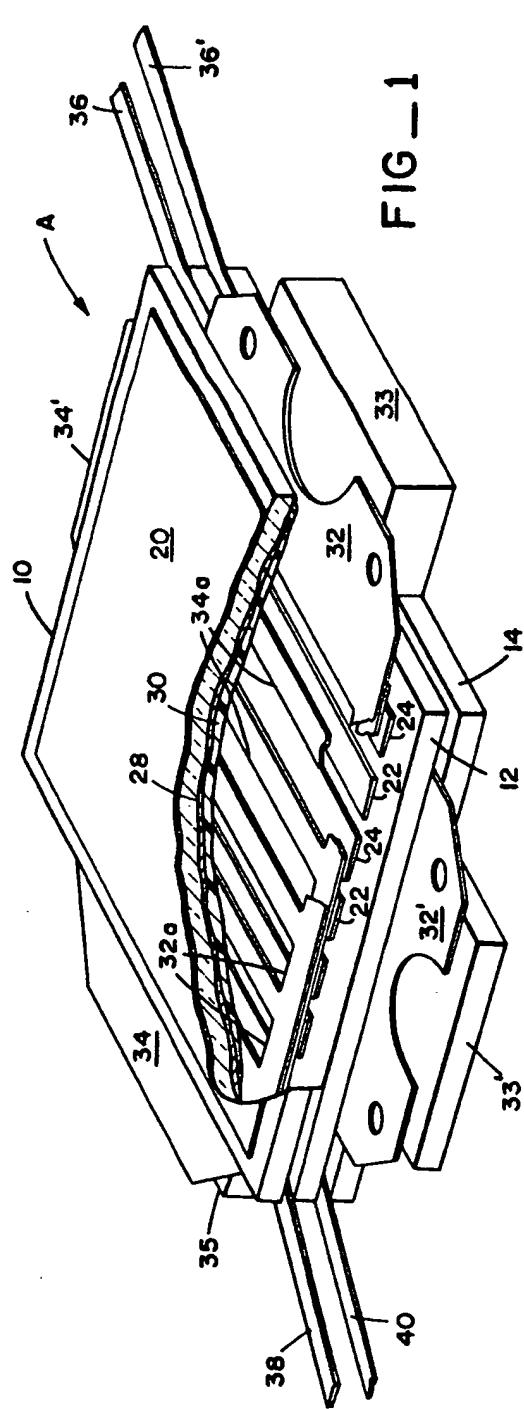
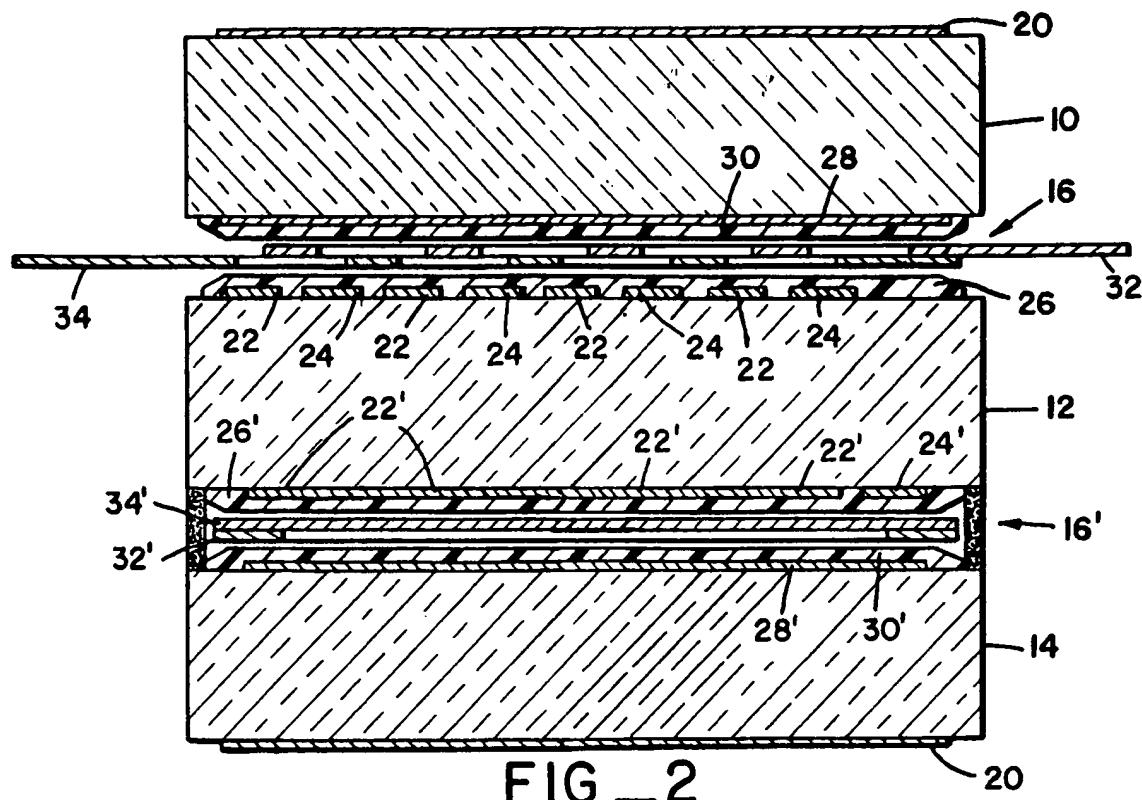
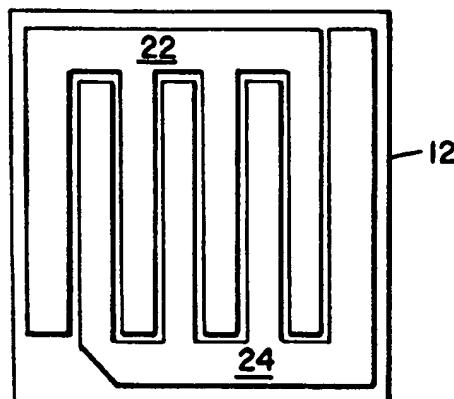


FIG - 5

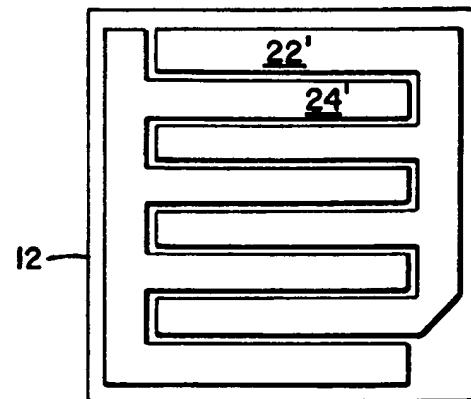
809842/0134



**FIG - 2**



FIG\_3a



FIG\_3b

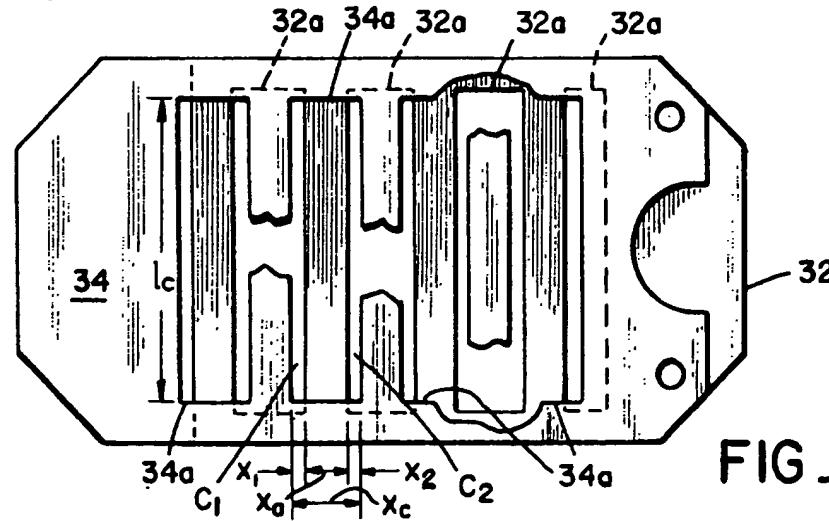


FIG - 4

DIPL-CHEM. DR VOLKER VOSSIUS MUNICH 86,

PATENT ATTORNEY

SIEBERTSTRASSE 4

P.O. BOX 86 07 67

Phone: (0 89) 47 40 75

CABLE ADDRESS:

BENZOLPATENT MÜNCHEN

TELEX 5-29453 VOPAT D

Our ref: M 162

Case: 6092-1D

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC.

Palo Alto, California, V.St.A.

---

"Apparatus for capacitive strain measurement"

---

Patent Claims

1. Apparatus for capacitive deformation measurement, characterized by at least two mounting boards (10, 12, 14), which each bound a gap between them, two capacitor plates (22, 24, 22', 24') which can be energized and are arranged on the

surface of a mounting board (12) bounding the gap, a capacitor measurement plate (28, 28') which is arranged on the surface of the other mounting board (10, 14) bounding the gap and parallel to the capacitor plates (22, 24, 22', 24') which can be energized, and a shutter arrangement (32, 34, 32', 34') between the capacitor plates (22, 24 and 22', 24') and the respective capacitor measurement plate (28 or 28') in order to vary the difference between the capacitances between the capacitor plates (22, 24 or 22', 24') and the capacitor plate (28 or 28') respectively as a function of a change in the shutter setting.

2. Apparatus according to Claim 1, characterized in that the shutter arrangement (2) has shutter plates (32, 34, 32', 34') which each have at least one aperture (32a) or (34a), in that the apertures (32a) in one shutter plate (32, 32') overlap the apertures (34a) in the other shutter plate (34, 34') in order in this way to form capacitor gaps (C1, C2) whose size can be varied with the movement of the shutter plates (32, 34 or 32', 34') relative to one another, in that the shutter plates (32, 34, 32', 34') project on opposite sides from the gap and in that coupling means (33, 35, 33') are provided in order to connect those sections of the shutter plates (32, 34, 32', 34') which project from the gap to the measurement surface on

which deformation is intended to be measured.

3. Apparatus according to Claim 2, characterized in that the coupling means have a pair of spacing elements (33, 35, 33') whose thickness corresponds to the distance between the measurement surface and those respective sections of the shutter plates (32, 34, 32', 34') which project outwards.

4. Apparatus according to one of Claims 1 to 3, characterized in that the capacitor plates (22, 24, 22', 24') which can be energized have a plurality of elongated finger-like projections which are arranged parallel and at a distance from one another, with the projections on one capacitor plate (22, 22') each being located between the projections on the other capacitor plate (24, 24').

5. Apparatus according to one of Claims 1 to 4, characterized in that the apparatus has an oscillator device (60) in order to apply alternating-current carrier signals to the capacitor plates (22, 24, 22', 24') which can be energized, with the carrier signal which is applied to one of the capacitor plates (22, 22' or 24, 24') which can be energized being phase-shifted through 180° with respect to the carrier signal which is applied to the other active capacitor

plate (24, 24' or 22, 22'), and that a phase-sensitive detector (165) is provided for measurement of the magnitude and phase of the signals which are coupled to the capacitor measurement plate (28, 28') through the shutter arrangement.

6. Apparatus according to Claim 1, characterized in that three mounting boards (10, 12, 14) are provided, stacked in layers one above the other, and two of which define a gap between them, in that at least one element which varies the capacitance, is arranged so that it can be moved and projects out of the gap is arranged in each gap, in that one of the deformation gauges (16, 16') which is formed in each case between two mounting boards (10, 12 or 12, 14) is arranged rotated through a predetermined angle with respect to the other deformation gauge (16', 16), and in that coupling means (33, 35, 33') are provided in order to connect those sections which project outwards of the elements which vary the capacitance to the measurement surface on which deformation is intended to be measured.

7. Apparatus according to Claim 6, characterized in that the predetermined angle is about  $90^\circ$ , as a result of which the measurement axes of the two deformation gauges (16, 16') run orthogonally with respect to one another.

8. Apparatus according to Claim 6 or 7, characterized in that the connecting means have a plurality of spacing elements (33, 35, 33'), whose thickness corresponds to the distance between the respective sections, which project outwards, of the elements (32, 34, 32', 34') which vary the capacitance, and the measurement surface.

9. Apparatus according to one of Claims 6 to 8, characterized in that the two deformation gauges (16, 16') each have at least one capacitor plate (22, 24, 22', 24') which can be energized on the surface of a mounting board (12) which bounds the gap and a capacitor measurement plate (28, 28'), which is arranged parallel to the capacitor plate (22, 22', 24, 24'), on that surface of the upper mounting board (10, 14) which points towards the gap, with the element (32, 34, 32', 34') which varies the capacitance being located between the capacitor plate (22, 24, 22', 24') and the capacitor measurement plate (28, 28').

10. Apparatus according to Claim 9, characterized in that an oscillator device (60) for production of an alternating-current carrier signal is connected to each of the capacitor plates (22, 22', 24, 24') which can be energized, and in that

a detector (165) is provided in order to record the alternating-current carrier signals which are coupled to the capacitor measurement plates (28, 28') through the corresponding elements (32, 34, 32', 34') which vary the capacitance.

11. Apparatus according to one of Claims 5 to 10, characterized in that the detector apparatus has a charge amplifier (62) which is connected to the capacitor measurement plate (28), and in that a feedback loop which couples the output and the input of the charge amplifier (62) to one another is provided in order to produce a virtual earth potential at the amplifier input.

12. Apparatus according to Claim 11, characterized in that the feedback loop has a capacitor (66).

13. Apparatus according to Claim 11 or 12, characterized in that the apparatus has a phase-sensitive demodulator (165), which is connected to the output (64) of the charge amplifier (62).

DIPL-CHEM. DR VOLKER VOSSIUS MUNICH 86,

PATENT ATTORNEY

SIEBERTSTRASSE 4

P.O. BOX 86 07 67

Phone: (0 89) 47 40 75

CABLE ADDRESS:

BENZOLPATENT MÜNCHEN

TELEX 5-29453 VOPAT D

Our ref: M 162

Case: 6092-1D

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC.

Palo Alto, California, V.St.A.

---

"Apparatus for capacitive strain measurement"

---

The invention relates to an apparatus for measurement of strains or stresses, in particular to a biaxial capacitive strain gauge.

It is normally desirable to determine the loads and forces which are acting on various elements of a structure in

order to ensure that these elements are designed in a suitable manner to allow them to withstand the loads that occur on them, with a certain safety margin. While the stress forces in simple structures can easily be calculated if the loads are known, these calculations are unreasonably complex for complicated structures and/or unknown loads, and in many cases the solution is virtually impossible. In many application fields, it is therefore desirable to determine the forces empirically. In general, the forces are not accessible by direct measurement. In fact, the strain or deformation of the material, which is directly functionally related to the force acting, is measured using strain gauges or stress gauges.

A strain gauge or strain measurement transducer is an apparatus which exhibits a change in an electrical variable as a function of the stress on or the deformation of the material. The most widely used type is the resistance strain gauge, comprising a wire whose electrical resistance changes when it is subject to strain. This wire in a resistance strain gauge is attached to the surface of the material in which a stress is intended to be measured, such that the stress or strain which occurs causes a corresponding change in the resistance. A suitable electronic circuit, which is normally in the form of a Wheatstone bridge, is used to detect and to

measure the change in the resistance, and thus the strain.

Unfortunately, wires which have the desired characteristics for use in resistance strain gauges are in general also subject to changes in resistance as a function of temperature changes. For short time periods, these changes can be compensated for by means of a temperature compensation circuit. However, relatively long-lasting relatively high temperatures can lead to changes in the resistance which result from phenomena known by the expression "thermal ageing". These resistance changes can in general not be compensated for.

Another type of strain gauge or strain measurement transducer uses the change in a capacitor capacitance as a function of the strain or stress as a measurement variable. Previous capacitive strain gauges have been designed in such a manner that the operative elements of the device are subjected to the load. In these capacitive strain gauges and in resistance strain gauges in which the electrical resistance is subjected to the influencing forces in a similar manner, the electrical characteristics of the measurement apparatus change gradually when a load is acting for a relatively long time, as a consequence of permanent deformation of the loaded elements.

These phenomena are generally referred to as "creeping". As a result of creeping and thermal ageing, strain gauges are in general unstable when they are used over lengthy time periods and in particular at high temperatures.

Strain gauges are single-axis devices, that is to say they react only to dimension changes in a single direction. In order to allow the forces to be determined accurately at a point, it is, however, necessary to measure the stress or strain in at least two directions, from which it is possible to determine the true amplitude and direction of the stress. For this purpose, two or more strain gauges can be fitted close to one another, and with a specific angular position with respect to one another, on the surface to be investigated. This proximity is imprecise if the actually measured stresses do not occur at exactly the same point. In general, it is therefore preferable to use strain gauges which can be placed in layers one above the other, in order in this way to create a multiple-axis strain gauge. This can respond to stresses acting in different directions and which are registered essentially at one and the same point on the material surface to be tested.

The invention is based on the object of specifying a

capacitive strain gauge which has better long-term stability and is considerably less susceptible to thermal ageing and creeping. Furthermore, the capacitive strain gauge should be designed such that it is suitable for production of a multiple-axis capacitive strain gauge and operates reliably and accurately, with a simple design.

According to one preferred embodiment of the invention, it is proposed that these objects be achieved by a two-axis capacitive strain gauge having a laminar layer structure which defines two single-axis capacitive strain gauges with measurement directions located orthogonally with respect to one another. Each capacitive strain gauge has active capacitor plates, which are energized by means of an oscillator, and a capacitor measurement plate which is arranged at a distance from the capacitor plates that have been energized, and parallel to them. A shutter mechanism in the form of two shutter plates provided with apertures is arranged between the active capacitor plates and the capacitor measurement plates. The end sections of the shutter plates which are provided with apertures project out of the layer structure and are connected to the surface in which a stress or strain is intended to be measured. A stress leads to a relative movement between the shutter plates, which in turn results in a change in the

capacitor coupling, which takes place through the apertures, between the capacitor measurement plate and the active capacitor plates.

This capacitance difference is thus functionally related to the stress to be measured, and is registered and measured by a suitable electronic apparatus. In one particular embodiment, the active capacitor plates of each strain gauge are energized by two signals which have the same amplitude but have been phase-shifted through  $180^\circ$  with respect to one another. The shutter mechanism which is formed by the shutter plates results, because of the stress occurring in the material, in a decrease in the capacitance between one active capacitor plate and the capacitor measurement plate, and at the same in an increase in the capacitance between the other active capacitor plate and the capacitor measurement plate. The resultant change in the signal levels is recorded by a phase-sensitive demodulator, which produces an analogue signal proportional to the voltage.

Since the shutter plates of the capacitive strain gauge which form the shutter mechanism are, according to the present invention, not subject to any stress forces, this essentially precludes the phenomenon of creeping. Furthermore, all of the

capacitor plates are held such that they are firmly associated with one another in order in this way to reduce to a minimum the phenomena of thermal ageing and creeping. This results in a capacitive strain gauge with better long-term stability. The electronic apparatus which is used for the two-axis capacitive strain gauge according to the invention is relatively uninfluenced by amplifier drift or interference signals. In particular, the outputs of the strain gauge can be kept at a virtual earth potential by the use of a suitable negative feedback loop in conjunction with the amplifiers, which are connected to the outputs of the strain gauge. If the capacitances between the active capacitor plates and the capacitor measurement plate are not in equilibrium, the output of the amplifier thus supplies the necessary charge via the feedback loop in order to change the input to the virtual earth potential. If the output lines of the strain gauge are at earth potential, there is no capacitive coupling between these lines and earth. An earthed screened cable can thus be used in order to screen the lines against differential signals. The wires from the two capacitor measurement plates of the two-axis strain gauge can be routed in the same screen without any "crosstalk" taking place. The cables may be long and may be fitted with a surrounding winding without this resulting in any disadvantageous effects.

Further features and advantages will become evident from the following description, in which the invention will be explained with reference to one exemplary embodiment and in conjunction with the attached drawings, in which:

Figure 1 shows a partially cutaway perspective view of a two-axis capacitive strain gauge according to one preferred embodiment of the present invention,

Figure 2 shows a cross section through the apparatus illustrated in Figure 1,

Figures 3a and 3b show plan views of the active capacitor plates of the apparatus illustrated in Figure 1,

Figure 4 shows a partially cutaway plan view of the shutter plates, which form the shutter mechanism, in the apparatus illustrated in Figure 1, and

Figure 5 shows a schematic diagram of the two-axis capacitive strain gauge according to the invention with the associated electronic circuit.

Figures 1 and 2 show a two-axis capacitive strain gauge, which is annotated in general with A, according to one preferred embodiment of the invention. The strain gauge A has three mounting boards or laminates 10, 12 and 14, which are arranged in layers one on top of the other, with two laminates 10, 12 and 12, 14 in each case bounding a gap between them. A first single-axis capacitive strain gauge 16, which responds to a stress in a first direction or on a first axis, is formed in the gap between the surfaces of the laminates 10 and 12 which are adjacent to one another and are arranged at a distance from one another. A second strain gauge 16' is formed in the same way in the gap between the mutually adjacent surfaces of the laminates 12 and 14 which are arranged at a distance from one another. The second strain gauge 16' responds to a stress in a second direction or on a second axis, which is at right angles to the first axis

According to the preferred embodiment of the invention, the design of the second strain gauge 16' is essentially identical to that of the first strain gauge 16, but is offset through 90° with respect to it in order in this way to align the measurement axes of the strain gauges 16 and 16' orthogonally to one another. Only the first strain gauge 16 will therefore be described in detail, with this description

also being applicable to the second strain gauge 16'. In order to assist understanding, the reference numbers used in conjunction with the first strain gauge 16' have also been used in the drawings for corresponding elements of the second strain gauge 16', but with the addition of a prime symbol. This means that the elements 22, 24 etc. of the first strain gauge 16 correspond to the elements 22', 24' etc. of the second strain gauge 16'.

The strain gauge 16 has two active capacitor plates 22 and 24, which are arranged on the surface of the laminate 12 pointing towards the interior of the gap. The capacitor plates 22 and 24 are referred to as active capacitor plates, since they are energized by signals from the electronic device which is used in conjunction with the strain gauge. As can be seen in Figure 3a, the active capacitor plates 22 and 24 lie on one plane and are each formed with a row of elongated projections or fingers, which are parallel to one another and whose bases are connected to one another. The fingers of the active capacitor plates 22 and 24 engage in one another in such a manner that the fingers of the active capacitor plates 22 and 24 are located in a row, parallel to one another, in an alternating sequence. As will become evident in even more detail in the following text, the fingers of the active

capacitor plates 22 and 24 run essentially at right angles to the stress measurement axis of the strain gauge 16. It can thus be seen from Figure 3b, in which the active capacitor plates 22' and 24' of the second strain gauge 16' are illustrated, that the capacitive plates 22' and 24' are rotated through 90° relative to the capacitor plates 22 and 24, so that the stress measurement axis of the strain gauge 16' runs at right angles to the stress measurement axis of the strain gauge 16.

A coating composed of a dielectric material covers the capacitor plates 22 and 24. The dielectric coating 26 is used for insulation of the active capacitor plates 22 and 24 from the other elements of the strain gauge 16. One corner of the capacitor plates 22 and 24 is in each case not insulated, so that electrical lines 38 and 40 can be attached to the corresponding capacitor plates 22 and 24, with this normally being done by spot welding.

A capacitor measurement plate 28 is arranged on the inner surface of the laminate 10 pointing towards the gap interior. The capacitor measurement plate 28 is in this manner held parallel to the active capacitor plates 22 and 24, and at a distance from them. The capacitor measurement plate 28 in

general has a rectangular shape, corresponding to the area which is enclosed by the fingers of the capacitor plates 22 and 24. The capacitor measurement plate 28 has this name because it is connected to a suitable electronic apparatus for measurement of the change in the capacitance difference between the active plates 22 and 24. An electrical line 36 is thus attached to the capacitor measurement plate 28, to be precise preferably by spot welding to one corner of the capacitor measurement plate 28. The surface of the capacitor measurement plate 28 is covered by a dielectric layer 30, similar to the dielectric coating 26 which covers the capacitor plates 22 and 24, in order to isolate the capacitor measurement plate 28 from the other elements of the strain gauge 16.

As can be seen from Figures 2 and 4, a shutter mechanism in the form of shutter plates 32 and 34 provided with apertures is arranged between the active capacitor plates 22 and 24 and the capacitor measurement plate 28. The shutter plates 32 and 34 are mounted in the gap defined between the laminates 10 and 12, such that they can be moved along the stress measurement axis of the strain gauge 16. The shutter plates 32 and 34 extend on opposite sides beyond the laminates 10 and 12, so that they can be connected to the surface in

which a stress or strain is intended to be measured. Spacing elements 33 and 35, respectively, are attached to the outer ends of the shutter plates 32 and 34 for this purpose. The thickness of the spacing elements 33 and 35 corresponds to the distance between the shutter plates 32 and 34 and the surface in which a deformation or strain is intended to be measured. Compression or expansion of the surface in which a stress is intended to be measured thus leads to a movement of the shutter plates 32 and 34 relative to one another. This movement is used to produce a capacitance difference between the active capacitor plates 22 and 24 and the capacitor measurement plate 28.

As can be seen in Figure 4, the shutter plates 32 and 34 each have a plurality of rectangular apertures, which are annotated 32a and 34a. The apertures 32a and 34a are aligned parallel with the fingers of the active capacitor plates 22 and 24. When the shutter plates 32 and 34 are located one above the other, the apertures 32a and 34a are offset with respect to one another and thus form a large number of elongated rectangular aperture slots which are open through the plates 32 and 34. To be more precise, each of the apertures 32a is centred with respect to two adjacent apertures 34a such that two capacitor gaps C1 and C2 are

formed which are open through the mutually overlapping sections of the apertures 32a and 34a. The number of capacitor gaps C1 and C2 is thus twice as great as the number of apertures 32a and 34a in the respective shutter plates 32 and 34.

This results in the formation of an alternating row of capacitor gaps C1 and C2, which differ from one another in such a way that their dimensions vary in an opposite manner when the shutter plates 32 and 34 are moved relative to one another. An inward movement of the shutter plates 32 and 34 thus results in a reduction in the capacitor gap C1, while the capacitor gap C2 is at the same time enlarged. The capacitor gap C1 is thus arranged close to the fingers of the capacitor plate 22 in the strain gauge, while the capacitor plate C2 is in contrast arranged close to the fingers of the capacitor plate 24. In a corresponding manner, an inward movement of the shutter plates 32 and 34 leads to a decrease in the capacitance between the capacitor plate 22 and the capacitor measurement plate 28, while the capacitance between the capacitor plate 24 and the capacitor measurement plate 28 is at the same time increased. In a similar manner, an outward movement of the shutter plates 32 and 34 leads to an increase in the capacitance between the capacitor plate 22 and the

capacitor measurement plate 28, while in contrast the capacitance between the capacitor plate 24 and the capacitor measurement plate 28 is at the same time decreased.

The principle of operation of the strain gauge is thus that the actual capacitance between the capacitor measurement plate 28 and the respective capacitor plate 22 or 24 is in each case governed by the relative position of the shutter plates. The actual capacitance between the capacitor plate 22 and the capacitor measurement plate 28 is proportional to the area of the capacitor gap C1. If a capacitor gap C1 is now considered, the capacitance between the capacitor plate 22 and the capacitor measurement plate 28 is now given by the following expression, ignoring edge effects:

$$C_1 = k \cdot x_1 \cdot l_c$$

In this case, k is a proportionality constant whose value depends on the plate separation and the dielectric constant. In a corresponding manner, the capacitance between the capacitor plate 24 and the capacitor measurement plate 28 is:

$$C_2 = k \cdot x_2 \cdot l_c$$

The capacitance difference is thus given by:

$$C_d = C_1 - C_2 = k \cdot l_c \cdot (x_1 - x_2)$$

otherwise

$$x_c = x_1 + x_a + x_2$$

it follows that

$$C_d = k \cdot l_c \cdot (2x_1 + x_a - x_c).$$

In this case,  $l_c$  is the length of a slot 34a,  $x_a$  is the width of a web between two mutually adjacent apertures 32a,  $x_c$  is the width of an aperture 34a,  $x_1$  is the width of a capacitor gap  $C_1$  and  $x_2$  is the width of a capacitor gap  $C_2$ .

The capacitance difference is thus a function of the relative position of the shutter plates 32 and 34 and of the dimensions of the apertures 32a and 34a, and the constant  $k$ .

The response accuracy of the strain gauge to relative movement of the shutter plates 32 and 34 is expressed by:

$$K_x = N \frac{dCd}{dx_1} = 2N \cdot k \cdot l_c$$

In this case, N indicates the number of apertures 32a and 34a, only one of which will be considered in the following analysis.

As has already been mentioned briefly above, the strain gauge 16', which is aligned orthogonally with respect to the strain gauge 16, is essentially identical to the strain gauge 6, in terms of design and method of operation. The aim, of course, is for the strain gauge 16' to respond to deformation in an orthogonal direction with respect to the stress measurement axis of the strain gauge 16, so that all of the elements of the strain gauge 16' are rotated through 90° with respect to the corresponding elements of the strain gauge 16. Apart from this, the design and method of operation correspond to the above description.

The two-axis capacitive strain gauge A according to the preferred embodiment of the present invention has safety devices against interference phenomena and disturbance signals. In particular, a pair of screening plates 20 are provided on the outer surfaces of the laminates 10 and 14 and

are earthed to the screen of the strain gauge A. The shutter plates 32, 34, 32' and 34' are earthed in the same way. If the strain gauge A is mounted on an earthed metal surface, the respective plates can be earthed by touching the surface on which deformation is intended to be measured. Otherwise, if the strain gauge A is intended to be used on an insulated or unearthing surface, earthing lines should be provided to the shutter plates. In addition to the screening by the screening plates 20 and the shutter plates 32 and 34, additional isolation is provided against interference phenomena and disturbance signals by the nature of the electronic device which is used together with the strain gauge A and will now be described in the following text.

The electronic device used together with the strain gauge A will now be described in more detail with reference to Figure 5. Since the strain gauges 16 and 16' are essentially independent of one another, a double-channel embodiment of the electronic device is provided for the two strain gauges 16 and 16', with the exception that a single signal transmitter can be used to energize the strain gauges. The strain gauge 16 is energized by an oscillator 60, which has a very low output impedance, by means of two carrier signals which are phase-shifted through 180° with respect to one another and have the

same amplitude. The line 38 thus connects a first phase output of the oscillator 60 to the capacitor plate 22. In a corresponding manner, the line 40 connects the output for the second phase (phase-shifted through 180° with respect to the first phase) of the oscillator 60 to the capacitor plate 24. Since a single oscillator 60 can be used to energize both strain gauges 16 and 16', the capacitor plates 22 and 22' are connected to the line 38 parallel to one another, and the capacitor plates 24 and 24' are connected to the line 40 parallel to one another.

The strain gauge 16 can be compared with two variable capacitors which are coupled to one another in such a manner that their capacitances vary inversely with respect to one another, as is illustrated in Figure 5. The outputs of the two capacitors coincide in the capacitor plate 28, which is connected to an output line 36. Without any stress or deformation being forced, the capacitor gaps C1 and C2 which are formed by the shutter plates 32 and 34 are essentially of identical magnitude, so that identical amplitudes of the first oscillator signal, which is in phase, and of the second or phase-shifted oscillator signal are coupled to the capacitor measurement plate 28. The signals of the same amplitude cancel one another out, so that the output signal from the strain

gauge 16 is equal to zero when no deformation is present. Compression of the surface on which deformation is intended to be measured leads to a constriction of the capacitor gap C1 and at the same time to widening of the capacitor slot C2. This results in a reduction in the amplitude of the in-phase oscillator signal which is coupled through the capacitor slots C1 to the capacitor measurement plate 28, and at the same time in an increase in the amplitude of the phase-shifted oscillator signal which is coupled through the capacitor gap C2 to the capacitor measurement plate 28. Compression deformation thus causes a phase-shifted output signal on the output line 36. In a corresponding manner, expansion deformation causes an increase in the capacitor gap C1 and a reduction in the capacitor gap C2, which leads to an in-phase output signal on the output line 36.

The output line 36 is connected to the input of a charge amplifier 62, for amplification of the signal, in order to record and to measure the signal which appears on the output line 36. The charge amplifier 62 has a feedback capacitor 66 which couples the output 64 with the input to the output line 36. The negative feedback which is produced by the feedback capacitor 66 is used to keep the output line 36 at a virtual earth potential. Thus, in particular, the appearance of a

signal on the output line 36 results in a sufficient amount of charge flowing back to the feedback capacitor 66 in order to change the output line 36 to a virtual earth potential. Holding the output line 36 at a virtual earth potential further reduces the sensitivity of the arrangement to any change in the cable capacitance and to disturbance signals. Furthermore, the output line 36 can be carried in a simple earthed screening cable, without any disadvantageous effects. The output line 36' which is connected to the orthogonally aligned strain gauge 16', can run in the same screening cable, parallel to the line 36.

The output 64 of the charge amplifier 62 can be connected to a phase-sensitive detector 165 in order to produce a simple direct-current signal, which is proportional to the capacitance difference and thus proportional to the deformation. The detector 165, for example a demodulator, is used to eliminate alternating-current carrier signals, although these receive real amplitude information. The demodulator is preferably phase-sensitive in order to make it possible to distinguish between compressive and extensive deformations, which produce output signals of opposite phase, as in the above description.

A large number of materials may be used for construction of a two-axis capacitive strain gauge A corresponding to the present invention. However, it has been found that certain materials are particularly suitable for use of the strain gauge in high-temperature environments. For example, the laminates 10, 12 and 14 are preferably produced from aluminium, while the capacitor plates 22, 24, 22', 24', the capacitor measurement plates 28 and 28' and the screening plates 20 are preferably composed of platinum printed on to the surface of the laminates 10, 12 and 14. The shutter plates 32, 34, 32', 34' are preferably produced from stainless steel. The apertures 32a, 34a, 32a' and 34a' are normally produced by means of a conventional photographic etching process. The dielectric insulating layers 26, 30, 26' and 30' may be formed essentially from a thin ceramic film. The lines 36, 36', 38 and 40 may be produced from nickel. All of these materials have been chosen on the basis of their resistance to oxidation at high temperatures, so that the preferred embodiment of the present invention is particularly suitable for use in high-temperature environments. For example a design according to the invention has been used successfully over long time periods at temperatures of approximately 593.6°C (1100°F). Other materials which are suitable for a given environment and have the required electrical characteristics can also, of

course, be used.

The major proportion of the capacitance which is developed between the capacitor plates on the one hand and the capacitor measurement plate on the other hand is a consequence of the air gap between the plates. The strain gauge A may, however, also operate with any non-conductive liquid in the gap between these plates, provided that this liquid does not physically impede the movement of the shutter plates 32, 34, 32' and 34'.

The strain gauge A according to the present invention may be constructed in any desired size. One suitable embodiment has a stack of laminates of an essentially square shape with an edge length of 12.7 mm and a height of 2.31 mm. One preferred nominal thickness for all of the plates and layers with the exception of the laminates 10, 12 and 14 is 0.0254 mm. It has been found that a total of four apertures 32a or 34a in the shutter plates 32 or 34 is suitable for a design such as this. In a corresponding manner, in this embodiment, the capacitor plates 22 and 24 each have four elongated projections or fingers, with four capacitor gaps C1 being provided for coupling of the capacitor plate 22 to the capacitor measurement plate 28, and four capacitor gaps C2

being provided for coupling of the capacitor plate 24 to the capacitor measurement plate 28. Other dimensions and numbers of apertures and gaps may, of course, also be used depending on the desired size and shape.